

UKŁADY AUTOMATYCZNEJ REGULACJI PRĄDU TERMOEMISJI ELEKTRONOWEJ W PRÓŻNIOWYCH PRZYRZĄDACH POMIAROWYCH

Bartosz Kania, Jarosław Sikora

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Automatyki i Metrologii

Streszczenie. Niniejsza praca zawiera przegląd dotychczas opracowanych układów regulacji prądu termoemisji elektronowej dla niskich energii elektronów wykorzystywanych w próżniowych przyrządach pomiarowych, między innymi, spektrometrach mas, próżniomierzach jonizacyjnych. W efekcie przeprowadzonej analizy zaproponowany został układ automatycznej regulacji prądu termoemisji elektronowej z cyfrowym, nieliniowym regulatorem PID.

Słowa kluczowe: układ automatycznej regulacji, prąd termoemisji elektronowej, jonizacja, próżniowe przyrządy pomiarowe

CIRCUITS OF THERMIONIC EMISSION CURRENT AUTOMATIC CONTROL IN VACUUM MEASUREMENT INSTRUMENTS

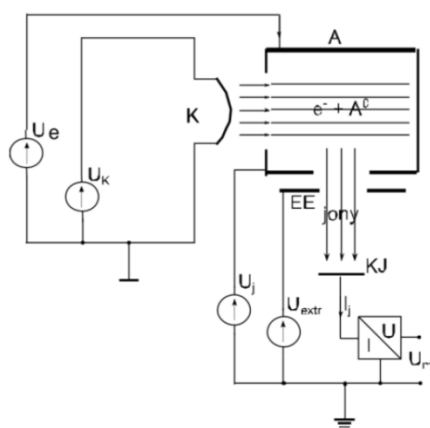
Abstract. This paper contains a review of thermionic emission current regulation circuits for low electron's energy widely used in vacuum measurement instruments for example mass spectrometers, ionization gauges. Based on the analysis results a new thermionic emission current controller using non-linear, digital PID configuration has been proposed.

Keywords: automatic control system, thermionic emission current, ionization, vacuum measurement instruments

Wstęp

Jonizacja strumieniem elektronów jest dobrze znaną metodą, w której rozpędzone elektrony oddziałują na cząsteczki gazu przekształcając je w jony. Technika ta jest szeroko stosowana w próżniowych przyrządach pomiarowych np. spektrometrach mas, próżniomierzach jonizacyjnych. W tego typu źródłach jonów, elektrony wytwarzane są w wyniku podgrzewania włókna prądem elektrycznym w warunkach wysokiej próżni. W takich systemach bardzo ważną wielkością jest prąd termoemisji elektronowej, ponieważ od niego zależy jakość jonizacji gazu, która ma decydujący wpływ na dokładność wykonywanych pomiarów. W tym celu niezbędna jest regulacja prądu żarzenia katody dla zapewnienia stabilizacji prądu termoemisji elektronowej. Rozwój metod automatycznej regulacji i jej zastosowań w coraz liczniejszych dziedzinach umożliwia również uzyskanie poprawy parametrów gazowych źródeł jonów z gorącym włóknem oraz uzyskanie nowych opcji np. kontroli pracy źródła z poziomu komputera klasy PC.

Istnieje wiele opracowanych układów automatycznej regulacji prądu termoemisji elektronowej [1-8], wśród nich rozwiązania zawierające regulatory analogowe [1, 2, 4, 5, 6, 8] oraz cyfrowe [3, 7], jednak nie zapewniają one doboru nastaw regulatorów w funkcji współrzędnych punktu pracy źródła elektronów.



Rys. 1. Uproszczony schemat źródła jonów

1. Obiekt sterowania

Obiekt poddawany regulacji to gorące włókno tj. katoda, która jest częścią złożonego systemu – aparatury pomiarowej, w której gaz poddawany jest jonizacji. Uproszczony schemat źródła jonów wraz z układem zasilania i detekcji przedstawiony jest na rys. 1.

Katoda (K) stanowi źródło elektronów tj. prądu jonizującego. W wyniku przepływu prądu ze źródła U_K katoda rozgrzewa się do wysokiej temperatury i dzięki temu emituje elektrony. Pomiędzy katodą (K) i anodą (A) istnieje napięcie przyspieszające U_e , dzięki któremu elektrony uzyskują zadaną energię kinetyczną. Ukształtowana wiązka elektronów (prąd jonizujący) o natężeniu I_e kierowana jest do komory o długości l , wypełnionej gazem o koncentracji n i całkowitym przekroju czynnym na jonizację Q_T , wywołując jonizację cząsteczek gazu. W efekcie powstaje prąd jonowy o natężeniu określonym wzorem (1):

$$I_j = I_e Q_T (U_e) n l \quad (1)$$

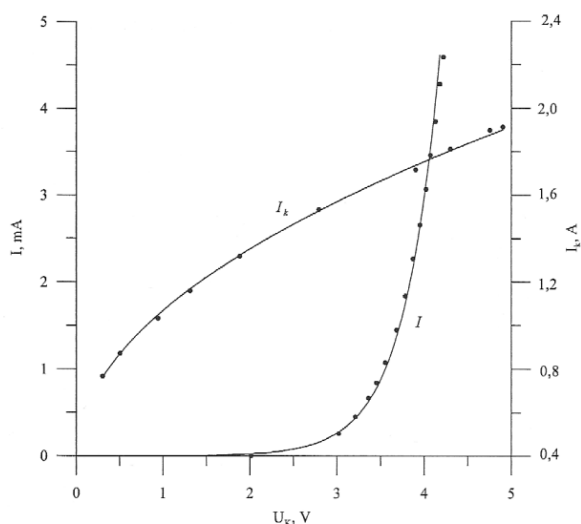
Wartość natężenia prądu jonowego jest źródłem informacji o parametrach mierzonej próżni w próżniomierzu jonizacyjnym lub o wartości ciśnienia parcyjnych w spektrometrze mas. Zgodnie ze wzorem (1) natężenia prądu jonowego jest zależne, między innymi, od natężenia wiązki jonizującej. O dokładności, powtarzalności i czasie realizacji pomiarów z wykorzystaniem próżniomierzy i spektrometrów mas decyduje stabilność prądu jonowego, który jak wynika z zależności (1) zależy od jakości stabilizacji prądu jonizującego. Z tego powodu wykonany został przegląd dotychczasowych rozwiązań układów automatycznej regulacji prądu jonizującego.

Istnieją różne rodzaje katod, z których relatywnie często wykorzystywane są katody wolframowe, wolframowe torowane czy irydowe pokryte tlenkiem itru.

Katoda wolframowa jest historycznie pierwszą konstrukcją katody ze względu na wysoką temperaturę topnienia wolframu. Posiada ona jednak wadę – emituje niewiele elektronów w przeliczeniu na jednostkę powierzchni, a co za tym idzie wymaga dostarczenia dużych mocy. Należy podgrzać ją do wysokiej temperatury, wyższej niż w przypadku innych rodzajów katod.

Problem ten został rozwiązany poprzez zastosowanie kompozytów np. wolframu torowanego czy wolframu lub irydu pokrytych tlenkami metali alkalicznych. Materiały te, w tej samej temperaturze wykazują nawet kilkunastokrotnie większą emisję elektronów z jednostki powierzchni w porównaniu do czystego wolframu. W związku z tym, aby uzyskać porównywalne natężenie prądu termoemisji jak dla katody wolframowej, katody te mogą być mniejsze oraz mogą pracować w niższej temperaturze. Do najistotniejszych wad należy ograniczona żywotność tych katod oraz wrażliwość na pracę w niewłaściwej temperaturze [3].

Dotychczasowe badania wykazały, że katoda, niezależnie od rodzaju wykonania, wykazuje nieliniową zależność prądu od napięcia zasilania oraz również nieliniową zależność prądu emisji elektronowej od napięcia zasilania [6]. Przykładową charakterystykę źródła ilustruje rys. 2.

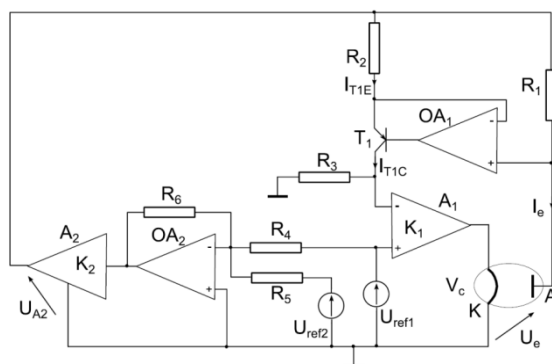


Rys. 2. Charakterystyki natężeń prądu grzejnego i prądu termoemisji elektronowej w funkcji napięcia zasilania katody

Wyniki badań przedstawione w pracy [1] wskazują, że odpowiedź prądu emisji elektronowej na skok jednostkowy napięcia zasilającego katodę ma charakter inercyjny, przy czym jest to inercja wyższego rzędu zależna od punktu pracy i parametrów wymuszenia. Przy pracach z tego typu obiektami sterowania często aproksymuje się inercję wyższego rzędu połączeniem opóźnienia i inercji pierwszego rzędu. Z nieliniowości tego obiektu wynika fakt, że regulator PID o stałych nastawach nie jest w stanie zapewnić właściwej stabilizacji dla różnych punktów pracy systemu. Stąd bierze się koncepcja regulatora PID o nastawach zależnych od punktu pracy systemu.

2. Układ regulacji prądu termoemisji elektronowej oraz napięcia przyspieszającego elektrony

Dotychczas opracowany został, między innymi, układ regulacji prądu termoemisji elektronowej oraz napięcia przyspieszającego elektrony [6]. Jego schemat ideowy jest przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu regulacji prądu termoemisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony [6]

W szczególności opisany zostanie układ regulacji prądu termoemisji, z pominięciem regulacji napięcia przyspieszającego. Prąd termoemisji elektronowej zadawany jest przez napięcie referencyjne U_{ref1} . Napięcie to podawane jest na dodatnie wejście wzmacniacza A_1 , będącego jednocześnie sumatorem sygnału zadanego oraz zmierzonego prądu elektronowego. Do ujemnego wejścia wzmacniacza dołączony jest sygnał napięciowy z obwodu ujemnego sprzężenia zwrotnego. Wyjście wzmacniacza zasila katodę. Obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego składa się z rezystora R_1 i lustra prądowego opartego na wzmacniaczu OA_1

i tranzystorze T_1 . Przy założeniu, że wzmacniacz OA_1 jest idealny, wartość jego wzmocnienia dąży do nieskończoności, co wywołuje wirtualne zwarcie pomiędzy wejściami odwracającym i nieodwracającym. W efekcie można zapisać, że spadek napięcia na rezystorze R_1 równy jest spadkowi napięcia na rezystorze R_2 :

$$I_{TIE}R_2 = I_e R_1, \quad (2)$$

natomiast dla tranzystora bipolarnego T_1 :

$$I_{TIC} = I_{TIE}/(1 + 1/\beta) \quad (3)$$

gdzie: I_{TIC} – natężenie prądu kolektora, I_{TIE} – natężenie prądu emitera, β – współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora T_1 .

Przy założeniu, że $\beta \gg 1$, na podstawie zależności (3), można przyjąć, że natężenie prądu kolektora równe jest natężeniu prądu emitera:

$$I_{TIC} = I_{TIE} \quad (4)$$

Podstawiając równanie (4) do (2) oraz zakładając, że rezystancje R_1 i R_2 są równe otrzymuje się:

$$I_{TIC} = I_e \quad (5)$$

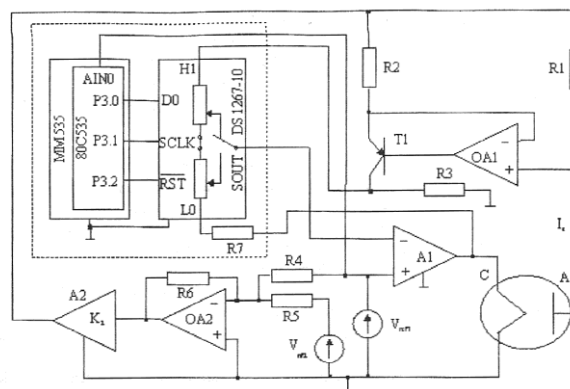
W ten sposób zrealizowane jest lustro prądowe zapewniające sprzężenie zwrotne dla układu regulacji. Wzmacniacz A_1 odejmuje spadek napięcia na rezystancji R_3 od napięcia referencyjnego U_{ref1} , wyznaczając w ten sposób sygnał błędu, który odpowiednio wzmocniony, steruje grzaniem katody.

Układ regulacji w takiej konfiguracji jest bardzo prosty, ponieważ wzmacniacz A_1 pełniący rolę regulatora zapewnia jedynie wzmocnienie sygnału błędu, ponadto wzmocnienie to jest stałe, niezależne od punktu pracy systemu. Posiada on jednak pewną zaletę – jest to pierwszy układ, który pozwala niezależnie sterować natężeniem wiązki jonizującej i energią elektronów w źródłach jonów z gorącą katodą. Właściwość ta umożliwia poprawę parametrów źródła elektronów dzięki relatywnie nieskomplikowanym regulatorom.

Jakość regulacji stałowartościowej, w tym układzie, przedstawiona została w postaci średniego odchylenia standardowego natężenia prądu emisji elektronowej i wynosi 0.025%, oraz 0.01% odpowiednio dla katody irydowanej pokrytej tlenkiem itru i katody z wolframu torowanego. Wyniki zostały uzyskane na podstawie pomiarów o czasie trwania 600 s [6].

3. Układ regulacji prądu termoemisji elektronowej z programowanym wzmocnieniem

Na rys. 4 jest przedstawiony schemat mikroprocesorowego układu regulacji prądu termoemisji elektronowej ze wzmocnieniem regulatora zależnym od natężenia prądu termoemisji elektronowej [7].



Rys. 4. Schemat mikroprocesorowego układu regulacji prądu termoemisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony z programowanym wzmocnieniem [7]

Układ ten jest rozbudowany w stosunku do układu opisanego w pracy [6]. Zmiana polega na zastosowaniu układu cyfrowego, dopasowującego wzmocnienie regulatora proporcjonalnego w zależności od aktualnego punktu pracy systemu. Takie rozwiązanie wskazane jest ze względu na fakt, iż katoda jest

obiektem nieliniowym. W układzie tym wartości wzmacnienia dla poszczególnych punktów pracy (obszarów charakterystyk) wyznaczone zostały doświadczalnie przy użyciu metody Zieglera-Nicholsa doboru nastaw regulatorów.

Na wspomniany układ cyfrowy składa się kontroler MM535 oparty na mikrokontrolerze Siemens PB 80C535 i potencjometr cyfrowy DS 1267. Do wejścia przetwornika A/D w kontrolerze doprowadzone jest napięcie referencyjne V_{ref1} , natomiast poprzez interfejs szeregowy, sterowany jest potencjometr cyfrowy posiadający 512 sekcji i całkowitą wartość rezystancji wynoszącą 20 k Ω . Liczbę rezystywnych sekcji potencjometru, włączonych między wejście i wyjście wzmacniacza A_1 wyraża poniższy wzór [7]:

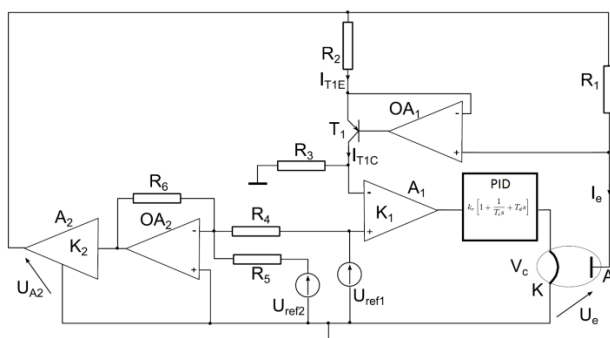
$$n(V_{ref1}) = \frac{510K_0 e^{-aV_{ref1}-5100}}{1+K_0 e^{-aV_{ref1}}} \quad (6)$$

Funkcja ta została zaimplementowana do pamięci programu kontrolera. Wartość V_{ref1} zadawana z przetwornika A/D, wyznacza punkt pracy układu, a tym samym optymalne ustawienie potencjometru, które jest odczytywane z tablicy zapisanej w pamięci kontrolera, w celu wysterowania potencjometru dla pożądanego wzmacnienia.

Weryfikacja eksperymentalna jakości sterowania została wykonana dla elektrody wolframowej o średnicy $\varnothing = 0,1$ mm i długości $l = 40$ mm przy ciśnieniu $p = 0,1$ Pa. Opisany układ pozwolił uzyskać średnie odchylenie standardowe prądu emisji elektronowej na poziomie 36 ppm tj. 0.0036% przy pomiarach trwających 300 s [7].

4. Układ regulacji prądu termoemisji elektronowej z cyfrowym, nieliniowym regulatorem typu PID

W przedstawionych układach regulacja stałowartościowa prądu termoemisji elektronowej realizowana jest przy użyciu regulatorów proporcjonalnych. W konsekwencji układy te obciążone są niedoskonałościami takimi jak np. niezerowy uchyb ustalony czy relatywnie niska odporność na zakłócenia. W celu zwiększenia jakości stabilizacji możliwe jest wykorzystanie bardziej zaawansowanego regulatora proporcjonalno-całkowiczko-różniczkującego (PID) z nieliniową mapą nastaw [7]. Praca źródła elektronów w nowoczesnych systemach pomiarowych wymaga także możliwości programowania i monitorowania pracy systemu, dlatego lepszym rozwiązaniem wydaje się być użycie cyfrowego regulatora zamiast analogowego, który to zdecydowanie łatwiej jest sprząć z komputerem nadzorującym. Wprowadzić były już podejmowane działania w celu implementacji regulatora typu PID dla sterowania gazowych źródeł elektronów [3], ale nie umożliwiają one wprowadzenia nieliniowej mapy nastaw regulatora, nie badano również jakości tego typu regulatorów. Na rys. 5 przedstawiony został schemat układu regulacji z wykorzystaniem proponowanego nieliniowego, programowanego regulatora typu PID.



Rys. 5. Schemat układu stabilizacji z cyfrowym regulatorem PID o programowanych nastawach

Zdecydowano się na konfigurację będącą rozwinięciem układów z [6,7] ze względu na cenną cechę tych układów – niezależność stabilizacji prądu termoemisji i napięcia

przyspieszającego. W świetle przeglądu literatury światowej sugerowana koncepcja regulatora prądu emisji elektronowej jest zagadnieniem nowym. Z tego powodu wykonane zostaną autorskie badania na obiektach fizycznych w celu wyznaczenia wskaźników jakości regulacji prądu termoelektronowego, między innymi, wartości odchylenia standardowego. Badania takie pozwolą ocenić jakość regulacji w porównaniu z dotychczas opracowanymi rozwiązaniami. Planowane jest wykorzystanie różnych metod doboru nastaw regulatora w celu wyznaczenia najlepszych, pod kątem jakości regulacji prądu termoelektronowego.

5. Wnioski

Dotychczas opracowane układy regulacji prądu termoemisji elektronowej, w większości, opierały się rozwiązaniach analogowych, trudnych do kompleksowego monitorowania i zmiany nastaw. Zaproponowany układ automatycznej regulacji oprócz poprawy parametrów strumienia elektronów ma także za zadanie ułatwić monitorowanie procesu regulacji czy też ingerencji w układ celem badania różnych konfiguracji pracy. W rezultacie możliwe będzie zarządzanie procesem regulacji „online” z poziomu komputera PC. Ponadto wyniki badań zaproponowanego układu we współpracy ze spektrometrem mas i próżniomierzem jonizacyjnym pozwolą ocenić jakość procesu jonizacji gazu i korzyści wynikające z zastosowania nieliniowego, cyfrowego regulatora typu PID.

Literatura

- [1] Donkov N., Knapp W.: Control of hot-filament ionization gauge emission current: mathematical model and model-based controller. Meas. Sci. Technol. 8, 1997, pp. 798–803.
- [2] Durakiewicz T.: Electron emission controller with pulsed heating of filament. Int. J. Mass Spectrom. Ion Process. 156, 1996, pp. 31–40.
- [3] Flaxer E.: Programmable smart electron emission controller for hot filament., Review of Scientific Instruments 82, 2011, 025111-8.
- [4] Halas S., Sikora J.: Electron emission stabilizer with a double negative feedback loop, Meas. Sci. Technol., 1, 1990, pp. 980–982.
- [5] Herbert B. K.: A circuit for stabilizing the electron current to the anode of a hot-filament device, Vacuum 26, 1976, pp. 363–9.
- [6] Sikora J.: Dual application of a biasing system to an electron source with a hot cathode, Meas. Sci. Technol., 15, 2004, N10 - N14.
- [7] Sikora J., Toborek K., Szczepaniak L.: Emission current stabilizer to electron-impact gas ion sources, Journal of Lviv Polytechnic University, 510, 2004, pp. 112–114.
- [8] Sikora J., Szczepaniak L.: Układ stabilizacji prądu termoemisji elektronowej zwłaszcza dla wysokich energii elektronów, Patent PL 210947, WUP Nr 3/2012.

Mgr inż. Bartosz Kania
e-mail: b.kania@pollub.pl

absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej na kierunku Elektrotechnika. W 2013 rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w dyscyplinie Elektrotechnika. Jest także pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Katedrze Automatyki i Metrologii Politechniki Lubelskiej. Praca naukowa skupia się m. in. na implementacji algorytmów sterowania oraz przetwarzania cyfrowych sygnałów pomiarowych. Uczestnik projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy - Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy".

Dr hab. inż. Jarosław Sikora, prof. PL
e-mail: jaroslaw.sikora@pollub.pl

Jest absolwentem Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej i Wydziału Mat.-Fiz.-Chem., kierunku Fizyka, UMCS. W Politechnice Lubelskiej uzyskał stopień doktora nauk technicznych oraz stopień doktora habilitowanego w zakresie dyscypliny naukowej Elektrotechnika. Prace naukowo-badawcze, które prowadzi w Katedrze Automatyki i Metrologii Politechniki Lubelskiej dotyczą, między innymi, implementacji metod przetwarzania sygnałów pomiarowych w układach regulacji przeznaczonych dla próżniowych przyrządów pomiarowych, wśród nich, spektrometrów mas, próżniomierzy jonizacyjnych, mikroskopów elektronowych.

otrzymano/received: 17.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 19.05.2014